

Leading Edge Receptivity of Flat-Plate Boundary Layer to Freestream Vortical Disturbances

著者	西尾 悠
号	57
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4740号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61863

	にしお ゆう
氏 名	西尾 悠
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成25年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械システムデザイン工学専攻
学 位 論 文 題 目	Leading Edge Receptivity of Flat-Plate Boundary Layer to Freestream Vortical Disturbances (主流中の渦状攪乱に対する平板境界層の前縁受容性に関する研究)
指 導 教 員	東北大学教授 福西 祐
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 福西 祐 東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 浅井 圭介 東北大学准教授 伊澤 精一郎

論 文 内 容 要 旨

物体表面に形成される境界層の状態は層流状態と、乱流状態の二つの状態に分類することができる。この状態間の移り変わりは遷移と呼ばれる。境界層の乱流状態への遷移は摩擦抵抗や熱伝達の急激な増加を招き、自動車や航空機、ターボ機械など工学の諸分野において設計上大きな問題である。例えば、航空機の翼型設計に際しては抵抗推算のため遷移点を正確に知ることが必要であるが、遷移点の位置は境界層に含まれる乱れが成長を開始する地点（中立安定点）における乱れの強さによって大きく変わってしまうため、その予測は経験則に頼らざるを得ないのが現状である。遷移の引き金となる境界層内に入り込む小さな乱れは、もともと一様流中に含まれていた音響攪乱や速度変動などが物体前縁部において境界層に受容されたものである。近年、この「受容」に関する研究も進められているが、その物理的な機構については未解明な点が多い。本論文では、一様流中に含まれる乱れとして形状の単純な直線渦を想定し、楕円状の前縁を有する平板に対する受容機構を明らかにすることを目的としている。特に、渦度変動に着目するという新しい視点から人為的に導入した渦状の攪乱の変形と前縁部壁面近傍に作られる渦度変動の関係を捉えなおし、下流の平板境界層において乱れとして内包されるまでの過程を風洞実験と数値計算により明らかにし、その本質を論じている。本論文はこれらの研究成果をとりまとめたものであり、全編5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、平板上流の一様流中に導入した横渦状の強い周期外乱に対する受容性を風洞実験と数値計算の双方により調べた。主流乱れは、風洞実験では振動翼により導入し、数値解析では上流の境界条件に速度変動を内包させることにより導入した。図1は数値解析から得られた前縁付近の速度変動場であり、(a)が水平方向、(b)が垂直方向の変動成分である。この結果は、前縁よどみ点近傍では垂直方向の速度変動が支配的であることを意味している。また、風洞実験においては制御された攪乱を生成するのは困難であり、渦構造のわずかな3次元化に伴い予期せぬはく離が発生する恐れがあることを指摘した。

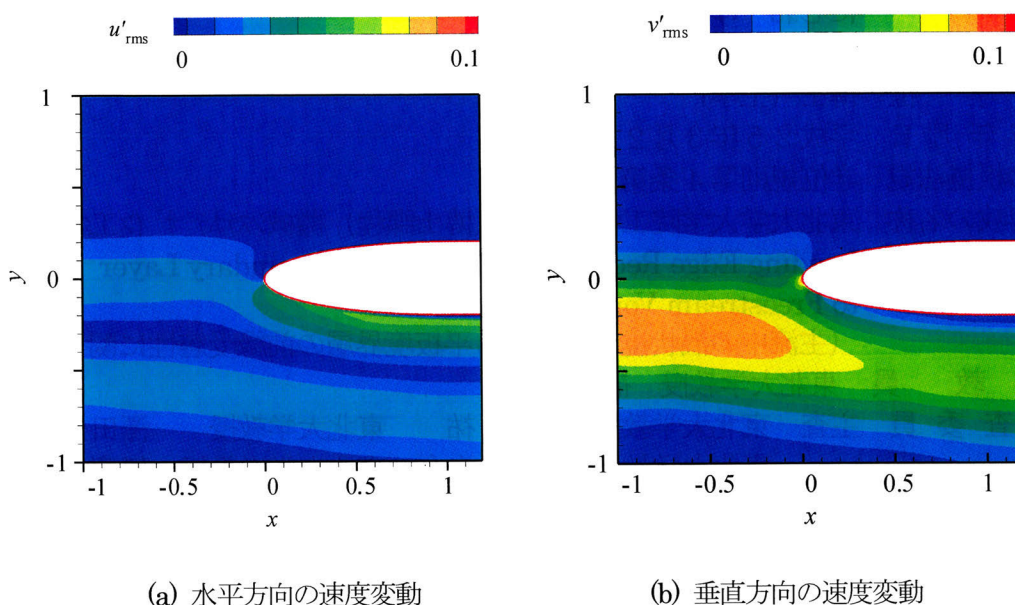


図 1: 前縁付近の速度変動分布

第 3 章は、2 次元かつ平板と平行な軸を持つ渦状攪乱に対する前縁受容性を数値計算にもとづいて議論したものであり、前縁受容性に対する一様流中の渦の垂直方向のスケール依存性、渦の衝突する位置と前縁受容性との関係、および楕円前縁のアスペクト比の影響を詳細に論じている。図 2 は渦の垂直方向スケールの影響を調査した結果であり、3 種類の一様流中に導入した渦の垂直方向のスケールに対する中立安定点における速度変動分布である。縦軸は境界層内壁面からの距離、横軸は速度変動を示す。この図より渦度パターンの垂直方向のスケールが大きくなるほど境界層低層の速度変動も大きくなっており、受容性が高くなることが分かった。次に渦のスケールは固定し、渦の衝突する位置を変化させることで受容性がどのように変化するかを調べた。そのときの境界層内の速度変動分布を図 3(a)に、また、同様の条件下での前縁淀み点近傍における垂直方向の速度変動分布 v'_{rms} を図 3(b)に示す。ここで $h=0$ の場合渦は淀み点に衝突し、 h が大きくなるほど主流中の渦が淀み点のより上方を通過する。淀み点の上方を渦が通過する場合、境界層に取り込まれる速度変動は渦を淀み点に衝突させる場合よりも大きくなるが、淀み点近傍の速度変動は逆に小さくなっている。ここで、一般に淀み点近傍の垂直方向の速度変動 v'_{rms} は淀み点の振動に直結するため、これまで受容性に対して支配的な要因であると信じられてきた。しかし、本研究の結果から、淀み点付近の速

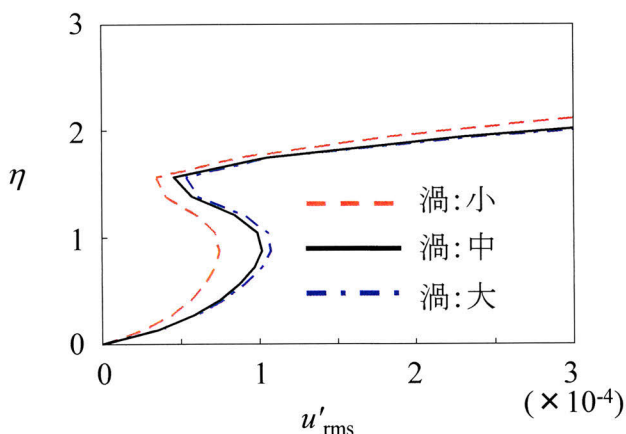
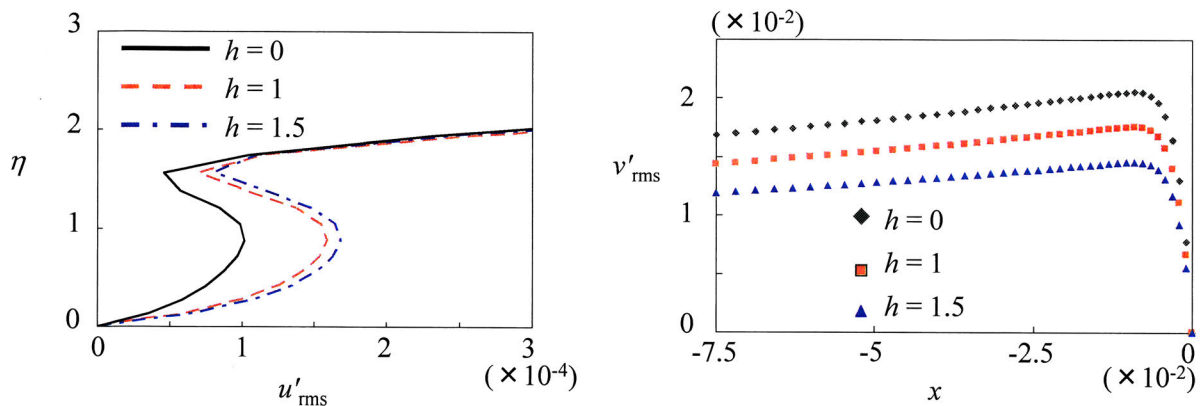


図 2: 中立安定点における境界層内の速度変動分布



(a) 中立安定点における境界層内の速度変動分布

(b) 淀み点付近における垂直方向の速度変動

図 3: 渦の衝突する位置の変化に対する受容性と前縁淀み点付近の速度変動の関係

度変動の大小関係と境界層に取り込まれる速度変動の大小関係は必ずしも一致せず、前縁よどみ点近傍の垂直方向の速度変動が受容性の支配的要因であると考えてきた従来の見解は誤っていたことを初めて明らかとなった。

さらに鋭い前縁と鈍い前縁での受容性の差異を議論し、鋭い前縁は受容性が低いという過去の報告と同様の結果を得られることを確認した後、渦度パターンに着目することで、アスペクト比の大きい鋭い前縁形状で受容性が低下するのは、壁面近傍の渦度勾配が急峻となり異符号の渦度の相殺が促進されるメカニズムに起因することを初めて示した。

第 4 章は、平板に対して垂直方向に軸を持つ渦状攪乱に対する前縁部受容性を数値計算にもとづいて議論したものである。平板前縁部における渦構造の変形と境界層内に現れる渦度変動の関係について詳細に調べた。図 4 に周期的に導入した渦が前縁に

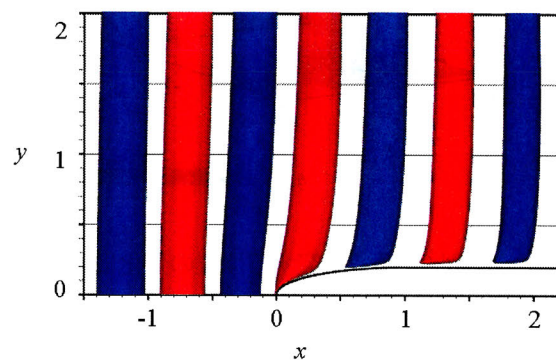


図 4: 平板前縁部における渦構造の変形

衝突し、変形している様子を示す。図中に示されているのは速度勾配テンソルの第二不変量である Q が正の等値面であり、渦の領域である。また垂直方向の渦度変動成分 ω'_y の正負で赤と青にそれぞれ色分けしている。この図から渦構造の傾きと伸長は壁面の近傍領域に限られることがわかる。図 5 に壁面上における渦度変動の流れ方向分布

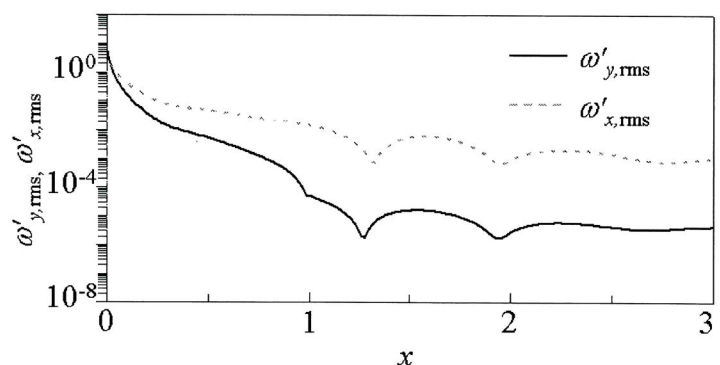


図 5: 壁面上での渦度変動の流れ方向分布

を示す。境界層内においては流れ方向に軸を持つ縦渦成分 ω_y' が卓越していることが確認できた。これらの新しい知見は、従来考えられていた前縁との干渉によって一様流中に縦渦構造が作られ、その結果として境界層中にストリーク構造が生成されるというシナリオが誤りであることを指摘した。この縦渦成分が生成されるメカニズムを調査するために、新たな計算として単一の渦度パターンを衝突させた場合の流れ場を調査した。結果として先行する渦が存在しなくても壁面に縦渦構造が誘起されることを明らかにし、この境界層中の縦渦成分は一様流中の垂直渦による誘導速度に起因することを初めて明らかにした。さらに、この流れ方向に単一の渦が前縁に衝突する前の境界層内の渦度変動を観察した。図6に単一の渦が前縁に接近していく様子を示し、主流中には垂直方向の渦度変動の等値面を、壁面には垂直方向の渦度分布を示している。図から主流中の渦は前縁に衝突する前から壁面に逆向きの渦度変動を誘起していることが示された。すなわち、主流中の渦は衝突前から境界層に影響を与え、その影響は無視できるものではないということを明らかにした。さらに主流中の渦が前縁に近づくにつれ、壁面に誘起される渦度変動は強くなることが確認できた。

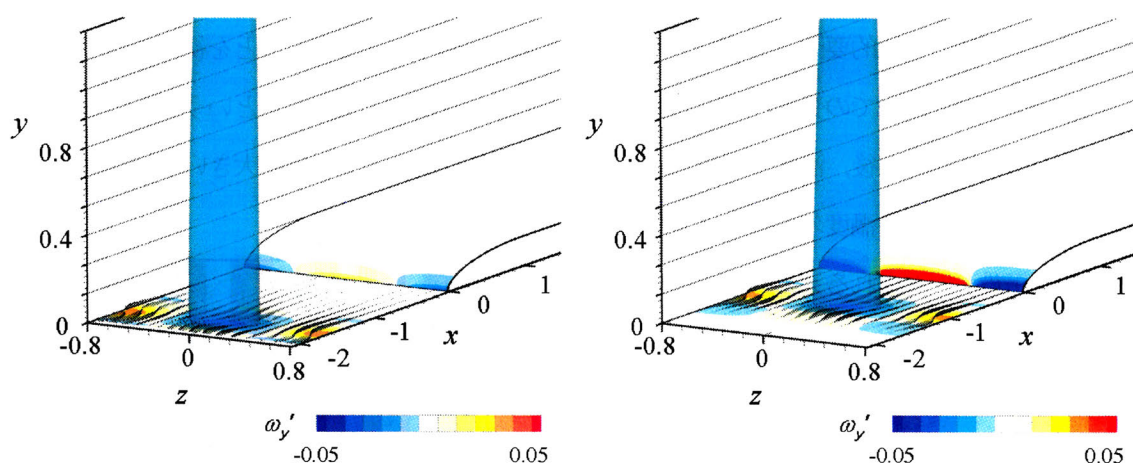


図6: 渦の衝突する位置の変化に対する受容性と前縁淀み点付近の速度変動の関係

第5章は結論である。

以上、要するに本論文は主流中の渦状攪乱と平板境界層の前縁部受容性の関係を明らかにしたものであり、特に渦度パターンの変化および誘起速度に着目し、論ずることにより、これらの物理量が受容性にとって非常に重要なファクターであることを明らかにしたものである。そして、明らかにした受容性に関する知見とともに渦度パターンの変化および誘起速度に着目することを提案している。

論文審査結果の要旨

物体表面に沿って形成される境界層の乱流への遷移は、摩擦抵抗や熱伝達の急激な増加を招き、自動車や航空機、ターボ機械など工学の諸分野において設計に与える影響が大きい。航空機の翼型設計に際して遷移点を正確に知ることが望まれるが、遷移点の位置は境界層に含まれる乱れが成長を開始する地点（中立安定点）における乱れの強さによって大きく変わってしまうため、遷移点の正確な予測のためには境界層内に入り込む小さな乱れを予測する必要がある。遷移の引き金となるこの小さな乱れは、もともと一様流中に含まれていた乱れが物体前縁部において境界層に受容されたものである。近年、この「受容」に関する研究も進められているが、その物理的な機構については未解明な点が多い。本論文では、一様流中に含まれる乱れとして形状の単純な直線渦を想定し、楕円状の前縁を有する平板に対する受容機構を明らかにすることを目的としている。特に、渦度変動に着目するという新しい視点から人為的に導入した渦状の攪乱の変形と前縁部壁面近傍に作られる渦度変動の関係を捉えなおし、下流の平板境界層において乱れとして内包されるまでの過程を風洞実験と数値計算により詳らかにし、その本質を論じている。本論文はこれらの研究成果をとりまとめたものであり、全編5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、平板上流の一様流中に導入した横渦状の強い周期外乱に対する受容性を風洞実験と数値計算の双方により調べ、前縁部近傍では垂直方向の速度変動が支配的であることを示している。またその過程で、風洞実験においては制御された攪乱を生成するのは困難であり、渦構造のわずかな3次元化に伴い予期せぬはく離が発生する恐れがあることを指摘している。これらの知見は、受容性を議論する際に、観察された現象を誤って解釈してしまう危険性を指摘したものであり、工学的に有用な成果である。

第3章では、2次元の渦状攪乱に対する前縁部受容性を数値計算にもとづいて議論したものであり、前縁よどみ点近傍の垂直方向の速度変動が受容性の支配的要因であると考えてきた従来の見解は誤っていたことを初めて明らかにしている。さらに、アスペクト比の大きい鋭い前縁形状で受容性が低下するのは、壁面近傍の渦度勾配が急峻となり異符号の渦度の相殺が促進されるメカニズムに起因することを初めて示している。これらの成果は乱れの受容過程に新たな知見を加え、前縁の設計指針に新たな視点を提供するもので、工学的・工業的に有用な成果である。

第4章では、垂直方向に軸を持つ渦状攪乱に対する前縁部受容性を数値計算にもとづいて議論したものである。平板前縁部における渦構造の変形と境界層内に現れる渦度変動の関係について詳細に調べ、渦構造の傾きと伸長は壁面の近傍領域に限られること、また境界層中の縦渦成分は主渦である一様流中の垂直渦による誘導速度に起因することを初めて明らかにしている。これらの新しい知見は、従来考えられていた前縁との干渉によって一様流中に縦渦構造が作られ、その結果として境界層中にストリーク構造が生成されるというシナリオが誤りであったことを指摘したもので、遷移研究に新たな知見を提供し、工学的に重要な成果である。

第5章は結論である。

以上、要するに本論文は主流中の渦状攪乱と平板境界層の前縁部受容性の関係を明らかにしたものであり、機械システムデザイン工学、特に流体工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。